基于 FPM 方法的入水问题数值模拟研究

王敏,马小晶,陈尉,张博文

(新疆大学电气工程学院,830047 乌鲁木齐)

摘　要:结构体入水作为一个高度非线性的冲击动力学问题,广泛存在于船舶海洋和军事等工程领域,因此,对该问题进行精确而高效的数值模拟是十分必要。采用有限质点法(finite particle method,FPM),结合无反射边界,数值模拟研究了二维结构体入水的动态过程。通过分析楔形体入水所受的垂向力、速度和压力,并与相关文献结果对比分析,验证了该方法的有效性。在此基础上,对不同工况下的入水问题进行了模拟,研究了不同尺寸、形状、初速度和质量等情况下,结构入水冲击时垂向力和速度随时间的变化规律,以及不同时刻下压力响应的变化趋势。研究结果表明:楔形体的底升角尺寸、结构体形状、入水初速度和质量等因素都会直接影响结构体入水的力学特性,为入水结构体的力学设计提供了参考。

关键词:FPM;无反射边界;数值模拟;结构体入水;力学特性

中图分类号:O353.4　　**文献标志码:**A

Numerical simulation of water-entry based on the finite particle method

WANG Min,MA Xiaojing,CHEN Wei,ZHANG Bowen

(College of Electrical Engineering,Xinjiang University,830047 Urumqi,China)

Abstract: Water entry of structures,a highly nonlinear impact dynamic process,is widely used in maritime and military fields. It is very necessary to simulate this problem accurately and effectively. The finite particle method (FPM) combined with the non-reflection boundary was adopted to simulate the problem of water entry. The vertical force,the velocity and the pressure of two-dimensional wedge were analyzed and compared with the results of the literature to verify the effectivity of this method. The factors for the problem of water entry were also studied in this paper. The effects of size,shape,initial velocity and mass on vertical force,velocity and pressure at different time were analyzed. It is shown that the mechanical properties of the structure are affected by the bottom angle of the wedge,the shape of the structure,the initial velocity and the mass,which has a reference for the design of the water-entry structure.

Key words: FPM;non-reflection boundary;numerical simulation;structure water entry;mechanical property

收稿日期:2021-11-19　　**修回日期:**2022-01-29

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 11762021;12002296);新疆自治区自然科学基金资助项目(No. 2017D01C085);新疆大学博士启动基金资助项目(No. BS160248)

通信作者:马小晶,副教授。E-mail: maxiaojing1983@xju.edu.cn

引用格式:王敏,马小晶,陈尉,等. 基于 FPM 方法的入水问题数值模拟研究[J]. 应用力学学报,2023,40(1):199-210.

WANG Min,MA Xiaojing,CHEN Wei,et al. Numerical simulation of water-entry based on the finite particle method[J]. Chinese journal of applied mechanics,2023,40(1):199-210.

入水问题作为一个常见的物理现象，广泛地存在于工程工业和生产生活中，尤其是在水上交通和军事等方面，如轮船、水上飞机、潜舰导弹入水等问题，都会涉及到结构体运动与水面的撞击，由于结构体受到较大的水动力作用，会发生失稳、变形乃至破损的现象，从而直接影响入水设施及系统的安全稳定运行。

结构体入水是一个复杂的、典型的流固耦合问题，在入水过程中，结构体会对水体产生冲击作用，造成水的飞溅和流动，同时水体又会产生反作用力施加在结构体上，使之发生变形或者破坏[1]。自文献[2]和文献[3]对入水问题展开研究以来，国内外学者采用不同的方法对该问题进行了深入分析[4-7]。文献[4]对楔形体跌落入水过程进行实验研究，分析了结构体上的撞击载荷，并与二维数值模拟结果进行了对比。文献[6]通过实验和数值模拟的方法研究了弹性楔形体的入水冲击问题。文献[7]对细长体高速入水物体的表面压力特性进行了试验研究。

随着数值计算方法的快速发展，数值模拟也成为研究入水问题的重要手段之一[8]。由于结构体的尺寸、形状和材料等参数会直接影响入水的动态过程，研究人员采用不同的模拟方法对不同工况下的入水问题进行了研究[9]。基于网格法的数值模拟方法已被广泛采用，文献[10]应用动网格技术和流体体积(volume of fluid，VOF)方法模拟了平底结构自由入水及空泡演化过程。

近年来，无网格方法也被应用于入水问题的研究。文献[11]采用任意拉格朗日-欧拉算法 ALE (Arbitrary Lagrange-Euler)模拟了二维楔形体入水过程。文献[12-13]则采用光滑粒子流体动力学方法(SPH)研究了该问题。文献[14]采用 Godunov SPH 方法模拟研究了弹性体的入水过程。针对传统 SPH 方法计算精度低、边界区域计算不足、数值不稳定等问题[15]，LIU 等[16]提出了一种精度更高的改进方法，即有限质点方法(finite particle method，FPM)，适合于模拟具有自由面、移动界面和可变形边界的大变形流动问题[17-20]。文献[17]采用 FPM 方法研究了孤立波的爬坡过程；文献[19-20]分别采用 FPM 方法研究了水中结构体与波浪的相互作用。然而，目前采用 FPM 方法模拟入水问题的相关研究报道较少。

本研究采用 FPM 方法对入水问题进行了数值模拟，通过结合无反射边界消除了水箱壁面回弹波的影响，与已有研究结果进行对比，验证了该方法的有效性和准确性；深入探究了结构体的底升角、形状、初速度和质量等因素对入水过程的影响，为入水冲击等复杂工程问题的设计优化提供理论依据。

1 FPM 方法

1.1 FPM 基本理论

根据文献[16]提出的 FPM 方法的基本理论，二维坐标系下 FPM 基本方程的离散格式为[21-22]

$$f_\alpha(r_i) = \sum_{j=1}^{N} \boldsymbol{A} f(r_j) W_{ij,\beta} \frac{m_j}{\rho_j} \tag{1}$$

其中，

$$\boldsymbol{A} = \begin{bmatrix} \sum_{j=1}^{N} \frac{m_j}{\rho_j} W_{ij} & \sum_{j=1}^{N} \frac{m_j}{\rho_j} W_{ij}(x_j - x_i) & \sum_{j=1}^{N} \frac{m_j}{\rho_j} W_{ij}(y_j - y_i) \\ \sum_{j=1}^{N} \frac{m_j}{\rho_j} W_{ij,x} & \sum_{j=1}^{N} \frac{m_j}{\rho_j} W_{ij,x}(x_j - x_i) & \sum_{j=1}^{N} \frac{m_j}{\rho_j} W_{ij,x}(y_j - y_i) \\ \sum_{j=1}^{N} \frac{m_j}{\rho_j} W_{ij,y} & \sum_{j=1}^{N} \frac{m_j}{\rho_j} W_{ij,y}(x_j - x_i) & \sum_{j=1}^{N} \frac{m_j}{\rho_j} W_{ij,y}(y_j - y_i) \end{bmatrix} \tag{2}$$

因此

$$\begin{bmatrix} f(x_i, y_i) \\ f_x(x_i, y_i) \\ f_y(x_i, y_i) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{j=1}^{N} \frac{m_j}{\rho_j} W_{ij} & \sum_{j=1}^{N} \frac{m_j}{\rho_j} W_{ij}(x_j - x_i) & \sum_{j=1}^{N} \frac{m_j}{\rho_j} W_{ij}(y_j - y_i) \\ \sum_{j=1}^{N} \frac{m_j}{\rho_j} W_{ij,x} & \sum_{j=1}^{N} \frac{m_j}{\rho_j} W_{ij,x}(x_j - x_i) & \sum_{j=1}^{N} \frac{m_j}{\rho_j} W_{ij,x}(y_j - y_i) \\ \sum_{j=1}^{N} \frac{m_j}{\rho_j} W_{ij,y} & \sum_{j=1}^{N} \frac{m_j}{\rho_j} W_{ij,y}(x_j - x_i) & \sum_{j=1}^{N} \frac{m_j}{\rho_j} W_{ij,y}(y_j - y_i) \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \sum_{j=1}^{N} \frac{m_j}{\rho_j} W_{ij} f(x_j, y_j) \\ \sum_{j=1}^{N} \frac{m_j}{\rho_j} W_{ij,x} f(x_j, y_j) \\ \sum_{j=1}^{N} \frac{m_j}{\rho_j} W_{ij,y} f(x_j, y_j) \end{bmatrix} \tag{3}$$

式中：$f_\alpha(r_i)$ 为粒子 i 的函数及其导数；$f(r_j)$ 为粒子 j 的函数；$W_{ij,\beta}$ 为核函数及其偏导数；$f(x_i, y_i)$，$f_x(x_i, y_i)$ 和 $f_y(x_i, y_i)$ 分别为点 (x_i, y_i) 处的函数及 x 和 y 方向上的偏导数；m_j 和 ρ_j 分别为粒子 j 的质量和密度；N 为支持域内与粒子 i 相互作用的粒子 j 的总数；$\boldsymbol{A}$ 为修正矩阵；α 和 β 代表坐标方向，以 α 为

例,当 $\alpha = 0$ 时表示函数本身,当 $\alpha = x$、y 时,分别表示函数在 x、y 方向上的导数。

本研究中采用了应用广泛的 B 样条函数[23]

$$W_{ij} = \alpha_d \begin{cases} \frac{2}{3} - R^2 + \frac{1}{2}R^3 & 0 \leqslant R < 1 \\ \frac{1}{6}(2-R)^3 & 1 \leqslant R < 2 \\ 0 & R \geqslant 2 \end{cases} \tag{4}$$

式中:二维空间中 α_d 为 $15/7\pi h^2$;h 为光滑长度;$R = r/h$,r 为两个粒子之间的距离。

1.2 控制方程的 FPM 离散形式

对于流固耦合问题而言,由于粒子的不一致性,传统 SPH 方法存在精度不高的问题[17],文献[16]提出的 FPM 方法,用于改进 SPH 方法固有的粒子不一致性,提高了求解精度。Navier-Stokes(N-S)方程的 FPM 离散形式为

$$\begin{cases} \frac{d\rho}{dt} = -\rho\frac{\partial \boldsymbol{u}}{\partial x^\beta} \\ \rho\frac{d\boldsymbol{u}}{dt} = -\frac{\partial p}{\partial x^\alpha} + \mu\frac{\partial \varepsilon^{\alpha\beta}}{\partial x^\beta} \end{cases} \tag{5}$$

为了克服压力的不稳定性,在连续性方程和动量守恒方程中分别加入密度扩散项和人工黏性项,式(5)可以改写为

$$\begin{cases} \frac{d\rho_i}{dt} = \rho_i\sum_{j=1}^{N}\boldsymbol{u}_{ij}\frac{\partial W}{\partial \boldsymbol{x}}\frac{m_j}{\rho_j} + \delta\bar{h}_{ij}c\sum_{j=1}^{N}\psi_{ij}\frac{\partial W}{\partial \boldsymbol{x}}\frac{m_j}{\rho_j} \\ \rho_i\frac{d\boldsymbol{u}_i}{dt} = -\sum_{j=1}^{N}(p_i+p_j)\frac{\partial W}{\partial \boldsymbol{x}}\frac{m_j}{\rho_j} + \\ \qquad \theta\bar{h}_{ij}c\rho_0\sum_{j=1}^{N}\varphi_{ij}\frac{\partial W}{\partial \boldsymbol{x}}\frac{m_j}{\rho_j} \end{cases} \tag{6}$$

式中:$\boldsymbol{u}$ 为速度矢量,$\boldsymbol{u}_{ij} = \boldsymbol{u}_i - \boldsymbol{u}_j$,$\bar{h}_{ij} = (h_i + h_j)/2$,$\boldsymbol{\psi}_{ij} = 2(\rho_i - \rho_j)\boldsymbol{x}_{ij}/|\boldsymbol{r}_{ij}|^2$;扩散项系数 $\delta = 0.1$;人工黏度系数 $\theta = 0.05$;$\varphi_{ij} = \boldsymbol{u}_{ij}\cdot\boldsymbol{x}_{ij}/|\boldsymbol{r}_{ij}|^2$,$\boldsymbol{r}_{ij} = \boldsymbol{x}_{ij} = \boldsymbol{x}_i - \boldsymbol{x}_j$,$\boldsymbol{x}$ 为粒子的空间坐标位置;ρ_0 为初始密度;c 为声速。

本研究将流体视为弱可压缩流体,其压力为[24]

$$p = c^2(\rho - \rho_0) \tag{7}$$

1.3 无反射边界处理

结构体入水冲击时会产生冲击波,冲击波到达箱体边界后会回弹并干扰内部流场,从而对结构体的运动产生一定的影响[12]。为了尽可能避免上述干扰,采用粒子法模拟时通常需要水体的尺寸远大于结构体的尺寸,使得计算区域较大,导致计算成本增加。本研究在水体边界选取一定厚度的粒子层,处理为无反射边界,从而可以完全避免水箱壁面边界导致的冲击波反射干扰现象,能够减小水体的尺寸并大幅度提高计算效率[20]。经多次实验模拟,结果表明,选取的粒子层厚度为搜索区域的 10 倍为最佳。

在所选的边界层内,动量守恒方程为[25]

$$\frac{d\boldsymbol{u}}{dt} = -\frac{1}{\rho}\nabla p - \left(\frac{\nu n_w}{K_p} + \frac{C_f n_w^2}{\sqrt{K_p}}\boldsymbol{u}\right)\boldsymbol{u} \tag{8}$$

式中:$n_w = 0.5$,$C_f = 0.5$,$K_p = 1.0 \times 10^{-6}$,$\nu = \theta ch/6$。

2 数值计算验证

2.1 算例模型的介绍

为了检验本研究 FPM 方法的准确性,对楔形体入水问题进行了模拟研究,算例模型如图 1 所示。水体的宽度为 2 m,深度为 0.7 m,初始密度为 1 000 kg/m^3;将楔形体处理为刚性结构,其初速度为 6.15 m/s,底升角 α 为 30°,质量为 241 kg。粒子直径 d 为 0.002 m,共有 359 748 个粒子,h 为 1.23 d,c 为 200。为保证求解的稳定性,时间步长应满足 CFL 条件,即 $\Delta t \leqslant 0.5 \times h/c$,$\Delta t$ 取为 5×10^{-6} s,模拟计算的总时长为 0.025 s。

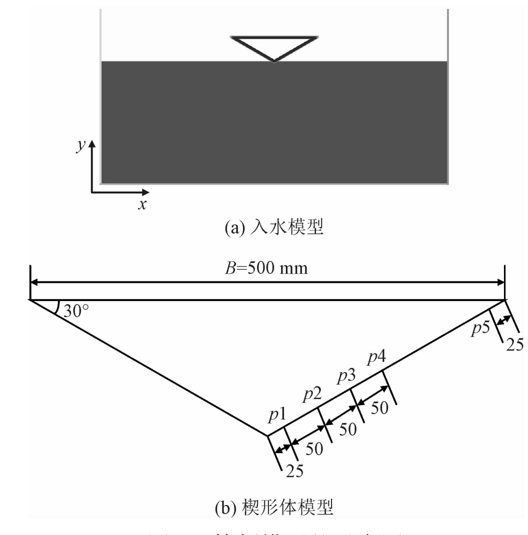


图 1 算例模型的示意图

Fig. 1 The schematic diagram of the computation model

2.2 算例模型的验证

本研究采用 FPM 方法模拟研究了楔形体撞击入水的动态过程,并与文献[4]和文献[12]进行了

对比分析。图 2 为作用于楔形体的垂向力曲线，图 3 给出了不同时刻下楔形体斜边的压力分布曲线。图中的压力分布按上述文献进行了相应的无量纲处理，其中，F_y 为楔形体所受阻力和重力之差，即垂向力，y 为楔形体斜边纵坐标，y_k 为楔形体顶点的纵坐标，y_d 为楔形体底边上的高，h 为水面高度，S 为水面高度与楔形体顶点纵坐标之差，V 为结构体的速度。

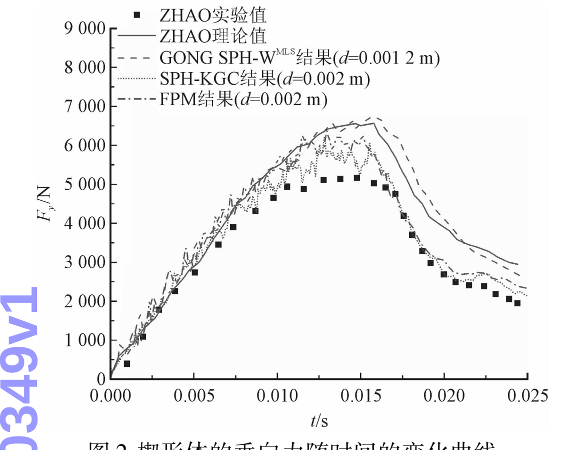


图 2 楔形体的垂向力随时间的变化曲线

Fig. 2 Variation of the vertical force on the wedge

由图 2 可知，楔形体所受的垂向力随时间的变化趋势与文献结果较为吻合。根据垂向力的变化趋势，将过程分为 3 个阶段：入水初期($0 \leqslant t < 0.008\ 33$ s)，垂向力急剧增大；入水中期($0.008\ 33$ s $\leqslant t < 0.016\ 67$ s)，垂向力达到顶峰并出现下降趋势；入水后期($0.016\ 67$ s $\leqslant t \leqslant 0.025$ s)，垂向力逐渐减小。

为了进一步验证模拟结果，本研究选取 3 个阶段中的不同时刻，给出了沿着楔形体斜边的压力分布，如图 3 所示。

图 2 和图 3 还给出了理论解和基于 SPH 方法改进的 SPH-W^{MLS} (moving-least-squares kernel) 方法和 SPH-KGC (kernel-gradient-correction) 方法模拟所得结果。从图 2 可以看出，不同方法所得的垂向力与文献[4]的理论解及实验值基本吻合，但在时间步骤 0.008 ~ 0.017s 的范围内均大于实验结果。观察不同时刻的压力分布曲线图 3 可以看出：在入水初期，不同方法得到的压力峰值之间的差异较大；在入水中期，本研究 FPM 方法和文献[12]的 SPH-W^{MLS} 方法与理论解的压力分布趋势基本一致，这 2 种方法所得结果差异较小，与理论解较为吻合，而 FPM 方法所得曲线波动小，较为光滑平缓。此外，FPM 方法比 SPH-W^{MLS} 方法较接近于实验值，虽然 SPH-KGC 方法最接近实验值，但与理论值偏离很大。在入水后期，SPH-W^{MLS} 方法所得压力曲线波动较大，而 FPM 方法的曲线波动小，与理论解相吻合，也比 SPH-W^{MLS} 方法接近实验值。同样 SPH-KGC 方法虽然最接近实验值，但仍然与理论值偏离很大。

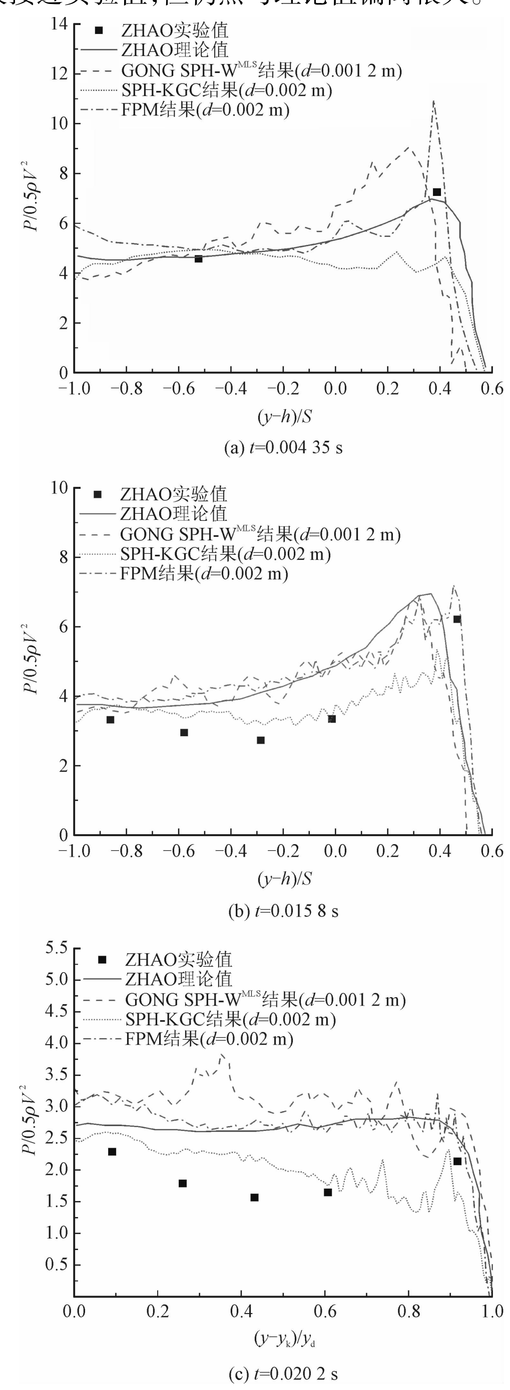


图 3 不同时刻下楔形体斜边的压力分布曲线

Fig. 3 Pressure distribution on the wedge bevel

本研究还给出了该 3 种时刻下水体的压力分布云图，如图 4 所示。从图 4 可以看出，采用不同粒子尺寸得到的压力分布云图在不同时刻下的变化趋势几乎一致，楔形体对水体的冲击作用随着入水深度的增加而减小，这是因为随着入水时间的增加，在水体对楔形体的阻力作用下，楔形体的动能不断消耗并减小，楔形体对水体的冲击作用逐渐减小。

图 4　不同粒子尺寸下水体的压力分布云图

Fig. 4　Pressure distribution of water with different particle sizes

为了分析粒子尺寸对计算结果的影响，这里还给出了作用于楔形体的垂向力曲线和不同时刻下楔形体斜边的压力分布曲线，分别如图 5 和图 6 所示。

从图 5 可以看出，粒子尺寸对楔形体的垂向力影响较小。从图 6 可以看出，粒子尺寸对楔形体的压力峰值及其出现的时间有一定影响。由于结构体所受压力主要来自于水体的作用，随着粒子尺寸的增大，构成溅起水花的粒子个数越少，尤其是入水初期沿着斜边爬升的水体粒子较少，从而出现支持域内粒子数目过少导致的求解偏差。由图 6 可知，当粒子尺寸等于 0.004 m 时，模拟结果与理论解存在着较大的差异。随着粒子尺寸的减小，当尺寸为 0.002 m时，除了在入水初期会出现压力峰值高于理论值之外，其余模拟结果均与理论解较为吻合。粒子直径为 0.001 562 5 m 和 0.002 m 在 i5-8250U 的 CPU 上计算总时长分别为 5.5 h 和 3 h，因此，综合考虑计算效率，本研究选取的粒子尺寸为 0.002 m。

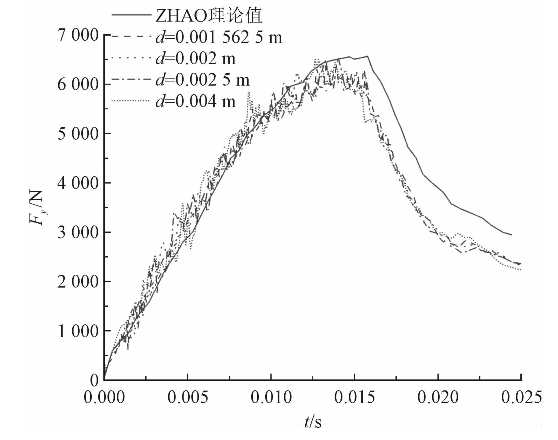


图 5　不同粒子尺寸下楔形体的垂向力随时间的变化曲线

Fig. 5　Variation of the vertical force on the wedge with different particle sizes

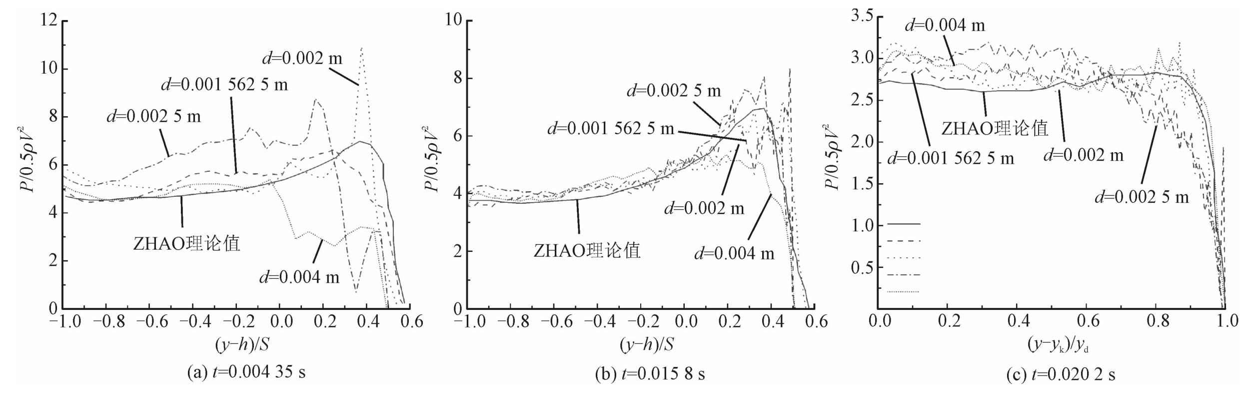


图 6　不同粒子尺寸下楔形体斜边的压力分布曲线

Fig. 6　Pressure distribution on the wedge bevel with different particle sizes

3　数值模拟及分析

入水结构体的尺寸、形状、初速度和材料都会直接影响入水的动态过程，为了深入研究结构体和水体的相互作用，本研究模拟了不同工况下不同结构体的入水过程，并对结构体的力学特性和冲击作用进行了分析。

3.1　角度的影响

图 7 ~ 图 9 给出了 20°、25°、30°和 35° 4 种不同底升角的楔形体入水的模拟结果，包括水体的压力分布云图、垂向力、速度以及楔形体斜边的压力随时间变化的曲线图。

t=0.004 35 s　　t=0.015 8 s　　t=0.020 2 s

图 7　不同底升角下水体的压力分布云图

Fig. 7　Pressure distribution of water with different bottom angles

其他参数与2.1中的数值保持一致。由图7可知，楔形体入水后，水体开始沿斜边爬升，楔形体两侧压力分布呈现出较好的对称性，随着入水时间的增加，楔形体冲击水体产生的压力波逐渐向四周传播；楔形体的底升角越小，楔形体对水体砰击挤压的影响域越大，水体沿斜边的爬升速度越快，飞溅幅度越大且飞溅射流越细长。

从图8和图9可以看出楔形体的底升角对垂向力、速度和楔形体斜边所受压力有明显的影响。由图8可知，楔形体的垂向力和下降速度密切相关。随着楔形体底升角的减小，楔形体所受的垂向力的峰值越大且越早达到峰值，在垂向力的作用下楔形体的下降速度随着底升角的减小而减小；随着入水时间的增加，水体对楔形体的垂向力逐渐减小后又增加，楔形体速度的降幅则逐渐增大而后减小。

由图9可以看出，楔形体底升角越小，随着入水时间的增加，楔形体斜边上的压力变化越大。在入水初期，楔形体斜边所受压力及其峰值随着底升角的减小而增大，但在入水的中期和后期，底升角为20°的楔形体斜边所受压力最小。由图9可知，在入水冲击的中期和后期，楔形体斜边上的压力呈现出高频的震荡，这是因为楔形体冲击过程中形成压力波造成水体发生波浪起伏，从而使得楔形体斜边所受压力出现波动。由此可以说明，楔形体入水冲击所受垂向力、速度和压力都与其底升角具有紧密的关联。

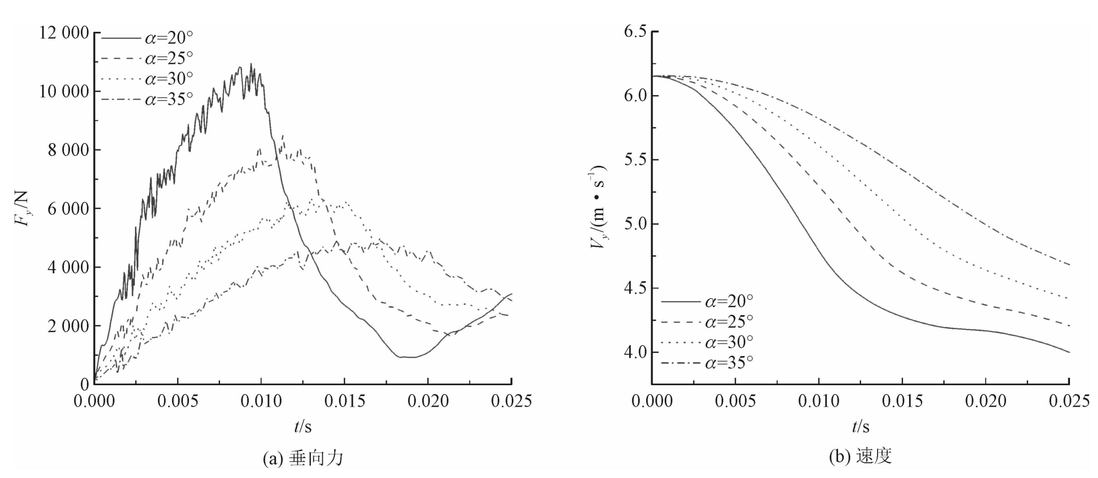


图8 不同底升角下楔形体的垂向力和速度随时间的变化曲线

Fig. 8 Variation of the vertical force and velocity on the wedge with different bottom angles

(a) t=0.004 35 s (b) t=0.015 8 s (c) t=0.020 2 s

图9 不同底升角下楔形体斜边的压力分布曲线

Fig. 9 Pressure distribution on the wedge bevel with different bottom angles

3.2 形状的影响

由于入水产生的水溅、垂向力和速度都会随着结构体形状的改变而产生较大差异，因此，本研究选取了圆柱体、楔形体和立方体3种入水结构，其横截面的尺寸分别为：圆形直径为0.2 m，三角形斜边长为0.2 m，底升角为30°，方形边长为0.2 m。结构体的质量均为50 kg，入水初速度为6.5 m/s。

从图10的压力分布云图可以看出，立方体入水过程中与水体的冲击接触面较大，导致水体受到了

较大的冲击作用，冲击波向底部水层传播的同时向两边移动，因此水体中出现较为明显的震荡弧形压力波。楔形体和圆柱体入水过程中水体的压力主要集中在结构体底部，圆柱体产生的冲击压力略小于楔形体，造成的水溅也较小，而楔形体由于其自身的结构特点，水体沿着斜边更容易向两边飞溅。

t=0.004 35 s　　t=0.015 8 s　　t=0.020 2 s

图 10　不同结构体的水体压力分布图

Fig. 10　The pressure distribution of water with different structures

图 11 和图 12 分别给出了不同结构体垂向力、速度和压力随时间的变化曲线，图中，x 为底部中心点距边缘的结构半宽。从图 11(a)可知：立方体的垂向力整体较小；圆柱体在入水瞬间垂向力最大，随后不断震荡减小；楔形体的垂向力则先增大后缓慢减小。结合图 11(b)可以看出：由于立方体所受的向上的垂向力最小，其下降速度不断增加；圆柱体和楔形体的速度逐渐减小，其中，后者入水速度的变化幅度较大，这是因为在冲击作用下水体沿着其斜边向两侧流动，二者的接触作用面积增大，加大了水体对楔形体的阻力，导致其向下的速度最小。

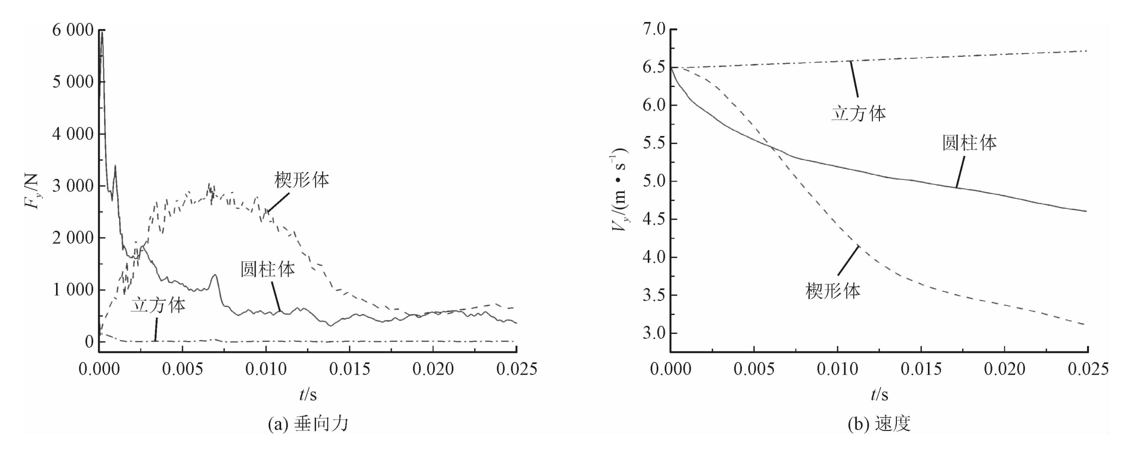


图 11　不同结构体的垂向力和速度随时间的变化曲线

Fig. 11　Variation of the vertical force and velocity with different structures

由图 12 可知,由于水体的反向冲击作用,结构体在与水体接触的区域具有较大的压力。在入水过程中,圆柱体所受的压力整体变化较小,中心底部的压力最大,沿弧两边逐渐减小;立方体所受压力均匀分布在与水体接触的底面上,并且整体随着入水时间的增加略微增大。对于楔形体而言,入水初期压力最大,约为其余 2 种结构体压力的 2 倍,并且压力沿着其斜边逐渐增大;随后,压力大幅下降,当斜边已完全入水后,斜边压力分布较为均匀。

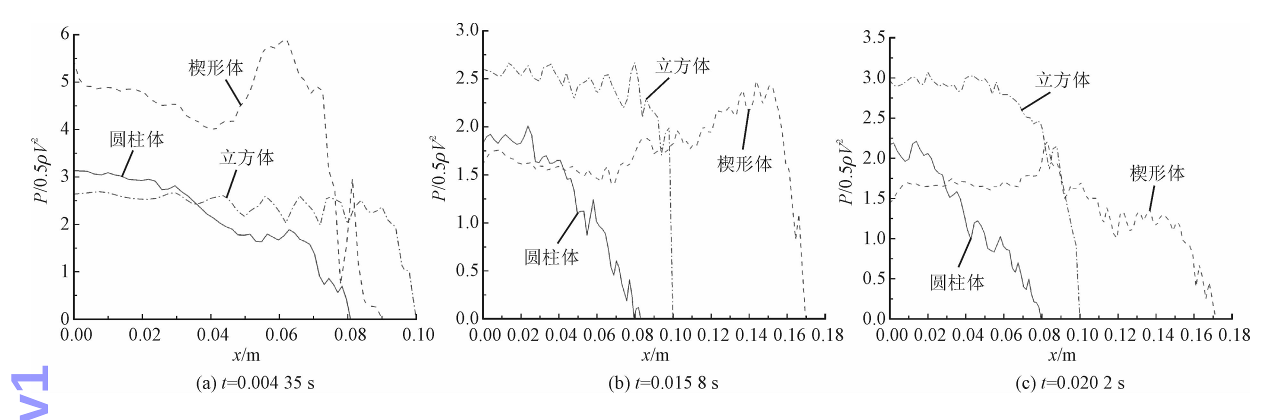


图 12 不同结构体的压力分布曲线

Fig. 12 Pressure distribution with different structures

3.3 初速度的影响

为了分析入水初速度对冲击过程的影响,本研究选取直径为 0.2 m 的圆柱体作为入水结构体,对不同初速度下的入水过程进行了模拟研究。结构体的质量为 50 kg,初速度 V_0 介于 2.5 ~ 7.5 m/s 之间。结构体的垂向力、速度和压力随时间的变化曲线如图 13 和图 14 所示。为了更好地分析速度的变化规律,图 13(b)中给出了结构体的速度相对变化量。

观察图 13 可以得出,初速度对结构体的垂向力和速度的变化趋势影响不大,但对二者的数值有一定的影响。随着初速度的减小,垂向力越小,速度相对变化量曲线越平缓,这说明初速度越小,在同一时刻下结构体的冲击越小,水体对结构体的垂向力越小,结构体的速度变化越小;由于初速度越大惯性越大,当初速度大于等于 5.5 m/s 时,垂向力会在 $t = 0.000\ 2$ s 附近产生一个峰值且响应时间较短,峰值随着初速度的增大而增大。因此,若要减小结构体的垂向力,可以降低结构体的入水初速度。

从图 14 所示的结构体的压力曲线图可以看出,入水速度是影响结构体承受压力的主要因素之一。结构体的入水初速度越小,所承受的压力与冲击动能的比值越大;就压力的整体分布而言,圆柱体入水底部的压力最大,沿着弧边压力逐渐减小,但在水花溅起的接触区域内,结构体表面压力出现了剧烈的波动,甚至出现了较大的压力值,初速度越小,波动越明显。

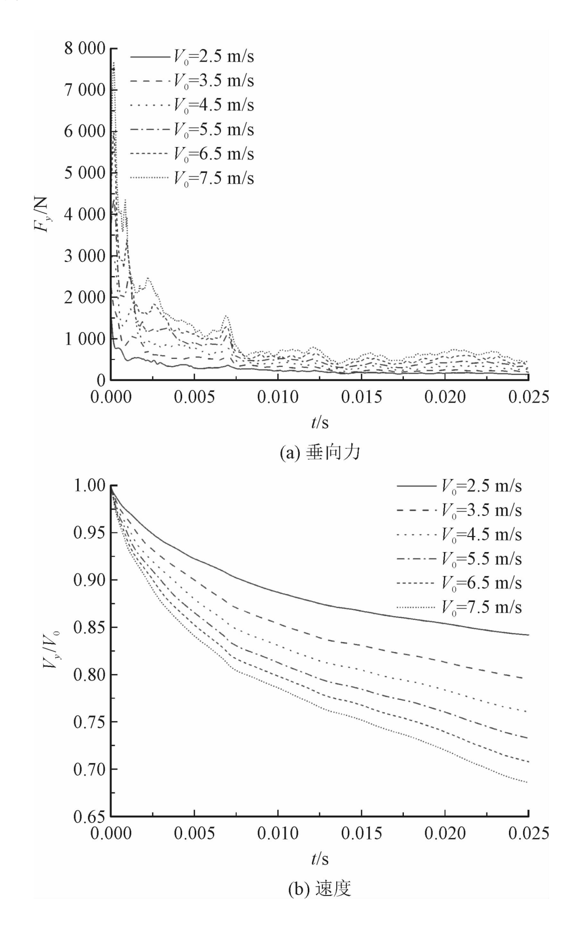


图 13 不同初速度下圆柱体的垂向力和速度随时间的变化曲线

Fig. 13 Variation of the vertical force and velocity on the cylinder with different initial velocities

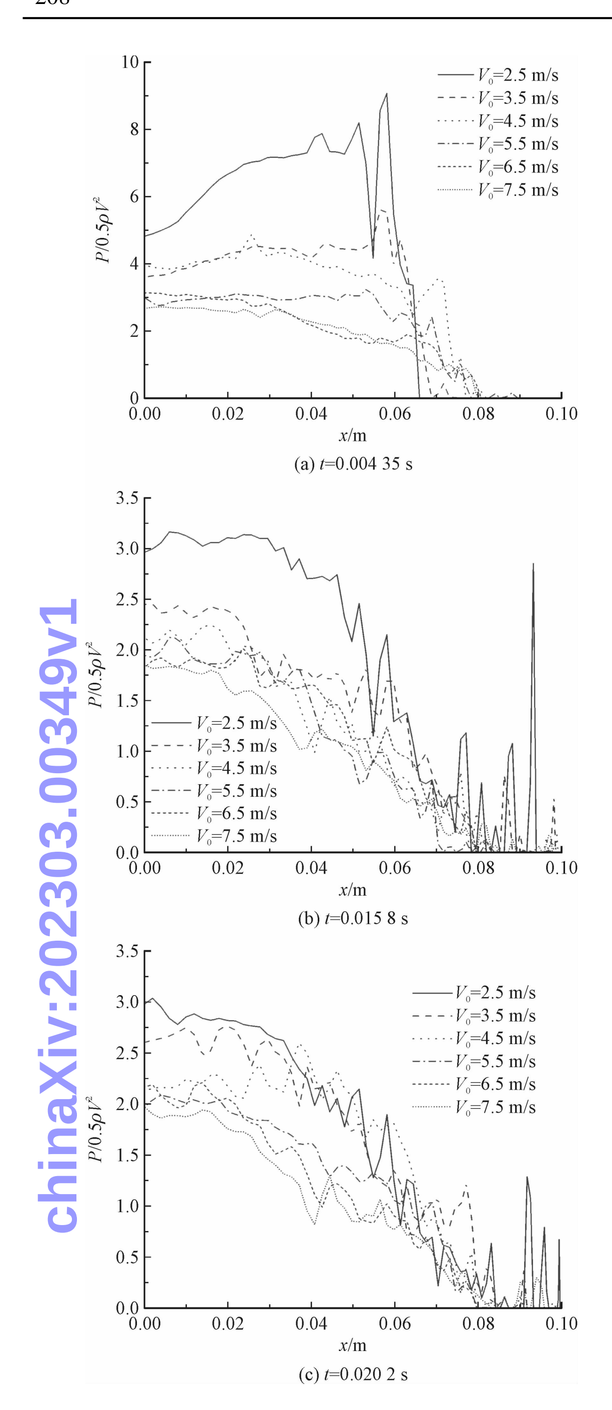


图 14　不同初速度下圆柱体的压力分布曲线

Fig. 14　Pressure distribution on the cylinder with different initial velocities

3.4　质量的影响

为了研究结构体质量对冲击过程的影响，本研究也对不同质量下的结构体入水过程进行了模拟研究。选取直径为 0.2 m，初速度为 6.5 m/s 的圆柱体作为入水结构体，结构体的质量介于 10 ~ 50 kg 之间。

图 15 和图 16 分别给出了结构体的垂向力、速度和压力随时间的变化曲线。

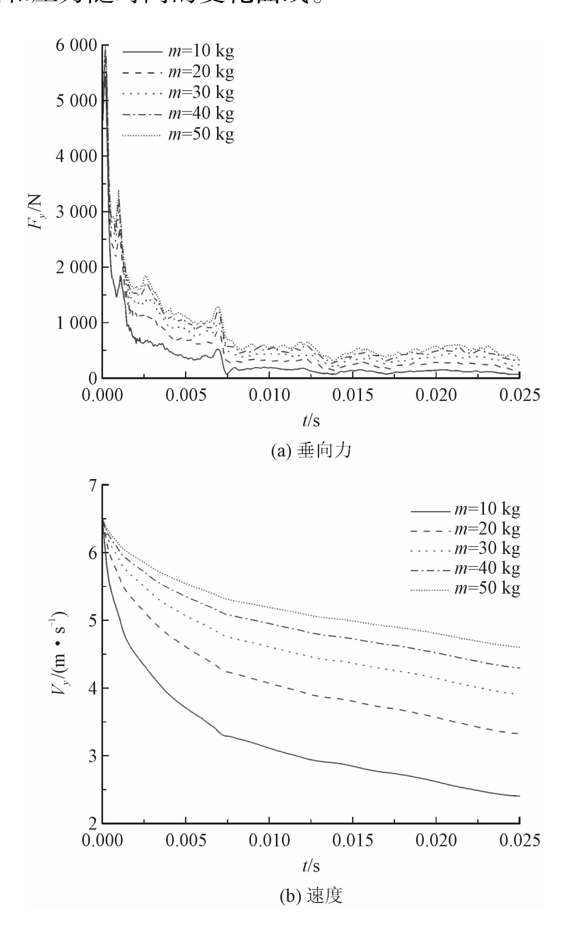


图 15　不同质量下圆柱体的垂向力和速度随时间的变化曲线

Fig. 15　Variation of the vertical force and velocity on the cylinder with different masses

由图 15(a)可知，质量对结构体的垂向力变化趋势影响不大，结构体垂向力的最大值和二次峰值以及其出现的时间均保持一致，在入水中期和后期垂向力随质量的增大而增大。由图 15(b)可以看出，随着质量的增加，速度曲线的变化越平缓，这说明质量越大惯性越大，因此冲击速度的变化较小。图 16 的压力特性曲线显示，质量越小，入水初期结构体底部的压力越小，随着入水深度增加，水体震荡并溅起水花，质量越小的结构体则越容易受到水体震荡的影响，从而导致压力出现剧烈的波动，而质量较大的结构体的压力曲线则相对平缓。与入水初速度相比，质量对结构体所承受冲击压力的影响相对较小。

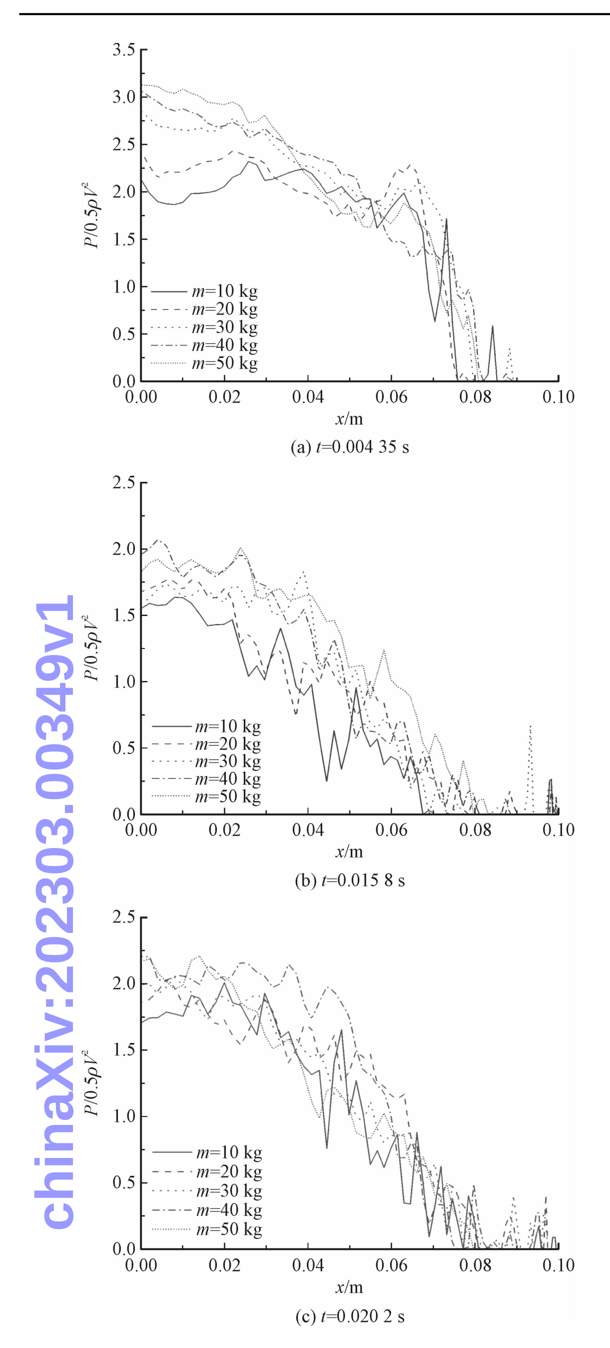


图 16　不同质量下圆柱体的压力分布曲线

Fig. 16　Pressure distribution on the cylinder with different masses

4　结　论

本研究采用 FPM 方法结合无反射边界处理方法，对二维结构体入水问题进行了模拟研究，着重分析了结构体的尺寸、形状、入水初速度和质量等因素对入水冲击过程的影响。通过分析结构体的受力情况和速度的动态变化过程，总结了不同工况下入水过程的运动变化规律，对入水结构体的外形设计和入水参数选取提供技术支撑，对理解结构体和水体的相互作用以及结构体的优化设计提供重要参考价值，所得结论如下。

1）通过模拟经典的楔形体入水过程，与相关理论解和现有 SPH-W^{MLS}、SPH-KGC 方法进行比较，发现采用 FPM 方法结合无反射边界得到的楔形体斜边压力和垂向力与理论值具有较好的吻合性，同时比较接近实验值。从理论和实验层面验证了本研究 FPM 方法和所建模型的准确性和有效性。

2）对楔形体的底升角进行了分析，随着底升角的减小，楔形体斜边上的压力变化越大，底升角越小，压力峰值越大且峰值出现的越早；当入水后期楔形体稳定后，底升角越小，结构体底面的压力越小；楔形体底升角的大小与垂向力和速度下降幅度呈负相关。

3）结构体的形状对入水结构体的垂向力、速度和压力均有较大影响。随着入水冲击时间的增加，圆柱体的垂向力震荡减小，楔形体的垂向力先增大后缓慢减小，而立方体的垂向力整体较小；圆柱体和楔形体的入水速度不断减小，而立方体的速度逐渐增大。由于楔形体更容易造成水体飞溅，在入水过程中结构体所受压力明显减小；圆柱体对水体的挤压作用较为明显，因此底部所受的冲击压力较大且降幅较小，压力沿弧形向两侧区域不断减小；立方体的平底结构对压力的变化趋势无明显影响。

4）结构体的初速度越大，垂向力和速度相对变化量的降幅均增大；结构体所受压力随着初速度的增加相对减小，在一定的范围内，增大初速度可以降低压力的波动震荡；结构体的质量越大，水体对结构体的减速作用越小，垂向力、速度和表面压力峰值整体均随着质量的增大而增大；与初速度相比，结构体质量对入水过程的影响相对较小。

参考文献：

［1］陈翔，饶成平，万德成. MPS 方法数值模拟楔形体入水问题［J］. 计算力学学报，2017，34（3）：356-362.
CHEN Xiang，RAO Chengping，WAN Decheng. Numerical simulation of water entry for two-dimensional wedge by MPS［J］. Chinese journal of computational mechanics，2017，34（3）：356-362（in Chinese）.

［2］VON KARMAN T. The impact on seaplane floats during landing［R］.［S. l.］：Technical Report Archive&Image Library，1929.

［3］WAGNER H. Über sto β-und gleitvorgänge an der oberfläche von flüssigkeiten［J］. Journal of applied mathematics and mechanics，

1932,12(4):193-215.

[4] ZHAO R, FALTINSEN O M, AARSNES J. Water entry of arbitrary two-dimensional sections with and without separation[C]//Proceedings of 21st Symposium on Naval Hydrodynamics. Trondheim: SNH, 1996:408-423.

[5] EI MAHDI Y, ALAIN D, YVAN C. Experimental study on the water impact of a symmetrical wedge[J]. Fluid dynamics research, 2005,38(1):47-66.

[6] PANCIROLI R, ABRATE S, MINAK G. Hydroelasticity in water-entry problems: Comparison between experimental and SPH results [J]. Composite structures, 2012,94:532-539.

[7] 时素果,杨晓光,王亚东,等. 细长体高速入水过程压力特性试验研究[J]. 应用力学学报,2018,35(2):223-227.
SHI Suguo, YANG Xiaoguang, WANG Yadong, et al. Experimental study on the pressure characteristic of high-speed slender body water entry[J]. Chinese journal of applied mechanics, 2018,35(2): 223-227(in Chinese).

[8] 骆寒冰,徐慧,余建星,等. 舰船砰击载荷及结构动响应研究综述[J]. 船舶力学,2010,14(4):439-450.
LUO Hanbing, XU Hui, YU Jianxing, et al. Review of the state of the art of dynamic responses induced by slamming loads on ship structures[J]. Journal of ship mechanics, 2010, 14(4): 439-450 (in Chinese).

[9] 刘双,武雨嫣,何广华,等. 物体自由入水的多参数影响分析[J]. 哈尔滨工程大学学报,2020,41(1):95-102.
LIU Shuang, WU Yuyan, HE Guanghua, et al. Multi-parameter influence analysis of free water entry problem[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2020,41(1):95-102(in Chinese).

[10] 王易君,李明海,张中礼,等. 基于 VOF 法的平底结构自由落体入水砰击载荷模拟[J]. 振动与冲击,2017,36(2):185-189.
WANG Yijun, LI Minghai, ZHANG Zhongli, et al. Numerical simulation on the slamming load in the water-entry process of flatted-bottom body based on the method VOF[J]. Journal of vibration and shock, 2017,36(2):185-189(in Chinese).

[11] 张苏,古彪,曹东风,等. 基于 ALE 算法的 V 形楔形体入水的水动力 特性分析[J]. 固体力学学报,2014,35(增刊1):95-100.
ZHANG Su, GU Biao, CAO Dongfeng, et al. Hydrodynamic behavior analysis of water entry of V-shaped wedge based on ALE method [J]. Chinese journal of solid mechanics, 2014,35(S1):95-100(in Chinese).

[12] GONG K, LIU H, WANG B L. Water entry of a wedge based on SPH model with an improved boundary treatment[J]. Journal of hydrodynamics, 2009,21(6):750-757.

[13] OGER G, DORING M, ALESSANDRINI B, et al. Two-dimensional SPH simulations of wedge water entries[J]. Journal of computational physics, 2005,213(2):803-822.

[14] WANG L, XU F, YANG Y. SPH scheme for simulating the water entry of an elastomer[J]. Ocean engineering, 2019,178(15):233-245.

[15] 刘谋斌,宗智,常建忠. 光滑粒子动力学方法的发展与应用[J]. 力学进展,2011,41(2):217-234.
LIU Moubin, ZONG Zhi, CHANG Jianzhong. Developments and applications of smoothed particle hydrodynamics[J]. Advances in mechanics, 2011,41(2):217-234(in Chinese).

[16] LIU M B, XIE W P, LIU G R. Modeling incompressible flows using a finite particle method[J]. Applied mathematical modelling, 2005,29(12):1252-1270.

[17] HE F, ZHANG H S, HUANG C, et al. Numerical investigation of the solitary wave breaking over a slope by using the finite particle method[J]. Coastal engineering, 2020,158:1-18.

[18] ZHANG Z L, WALAYAT K, HUANG C, et al. A finite particle method with particle shifting technique for modeling particulate flows with thermal convection[J]. International journal of heat and mass transfer, 2019,128:1245-1262.

[19] WENG X, HUANG C, LONG T, et al. An integrated finite particle method with perfectly matched layer for modeling wave-structure interaction[J]. Coastal engineering journal, 2019,61(1):78-95.

[20] HUANG C, ZHANG D H, SI Y L, et al. Coupled finite particle method for simulations of wave and structure interaction[J]. Coastal engineering, 2018,140:147-160.

[21] 王璐,杨扬,徐绯. 一种考虑界面不连续的改进的有限粒子法[J]. 爆炸与冲击,2019,39(2):121-132.
WANG Lu, YANG Yang, XU Fei. An improved finite particle method for discontinuous interface problems[J]. Explosion and shock waves, 2019,39(2):121-132(in Chinese).

[22] 雷娟棉,彭雪莹,黄灿,等. 应用 FPM 方法模拟封闭方腔自然对流[J]. 北京理工大学学报,2016,36(8):771-776.
LEI Juanmian, PENG Xueying, HUANG Can, et al. Finite particle method (FPM) modeling of natural convection in a closed square cavity[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2016,36 (8):771-776(in Chinese).

[23] MONAGHAN J J, LATTANZIO J C. A refined particle method for astrophysical problems[J]. Astronomy & astrophysics, 1985, 149 (1):135-143.

[24] MORRIS J P, FOX P J, ZHU Y. Modeling low Reynolds number incompressible flows using SPH[J]. Journal of computational physics, 1997,136(1):214-226.

[25] YANG X F, LIU M B, PENG S L. Smoothed particle hydrodynamics modeling of viscous liquid drop without tensile instability[J]. Computers and fluids, 2014,92:199-208.

(编辑　张璐)